HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	凍土の圧縮強度と動的性質
Author(s)	井上, 正則; 木下, 誠一
Citation	低温科學. 物理篇, 33, 243-253
Issue Date	1976-03-30
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18291
Type	departmental bulletin paper
File Information	33_p243-253.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Masanori INOUE and Seiiti KINOSITA 1975 Mechanical Properties of Frozen Soil. *Low Temperature Science, Ser. A, 33.* (With English Summary p. 253)

凍土の圧縮強度と動的性質*

井上正則
(北海道大学大学院　理学研究科)
木下誠一
(低温科学研究所)

(昭和50年10月受理)

I. はじめに

土は凍ると，非常に硬くなる。土の種類によって異なるが，圧縮強度は数倍から百倍にもなる。このことが，一方では冬期の土木工事を困難にさせ，又一方では軟弱地盤を一時的に凍らせて掘削を行なう地盤凍結工法に利用されている。

凍土の圧縮強度は，土質，温度，含水比に影響され，又その粘弾性的特性から圧縮速度にも依存する。圧縮強度の試験では，土の試料は，一回の試験ごとに破壊されてしまう。そこで，非破壊試験として，試料内を伝播する超音波パルスの速度を求めて，その値から試料の弾性定数を求める方法がある。

筆者等は，凍土の一軸圧縮試験を行なって圧縮強度を求める一方，超音波を用いて上記の非破壊試験を行ない，圧縮強度と弾性定数との対応を調べた。これらの試験を，試料の土質，温度，含水比を広範に変えて行った。

II. 実験方法

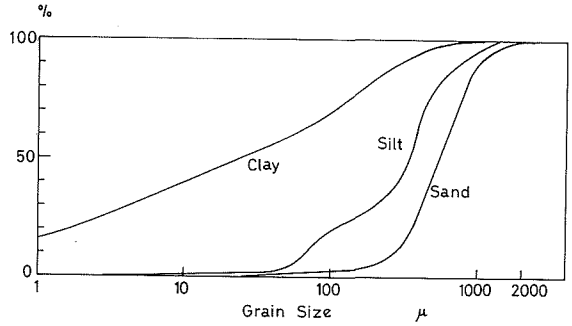
1. 実験に用いた土の試料

実験には，三種類の典型的な土質，すなわち砂，シルト，粘土を用いた。砂としては，北海道北東部のサロマ湖周辺の古砂丘から採取したもの，シルトとしては，苫小牧北大演習林付近の海成段丘上の風化した細粒火山灰から採取したもの，又粘土としては，北海道北東部の小向付近の重粘土から採取した。これらの土の粒度分布を第1図の累積頻度曲線に示す。粒度を求めるには，まず篩選別を乾式で行ない，その後で，44 μ のメッシュを通過した分について，水中沈降速度の測定を行なった。

これらの砂，シルト，粘土の物理特性の一部を次に示す。

	粒比重	塑性限界	液性限界
砂	2.71		10.5%
シルト	2.61	36.4%	41.3%
粘土	2.60	18.8%	41.1%

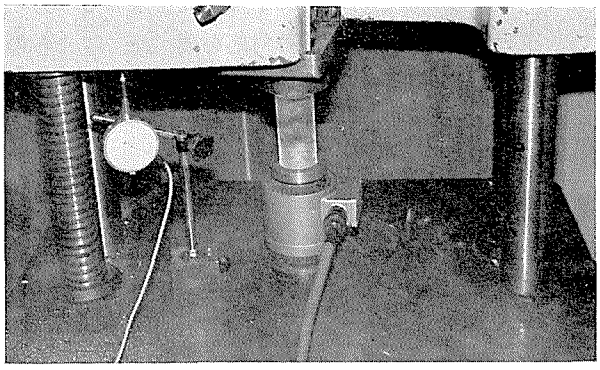
* 北海道大学低温科学研究所業績　第1708号



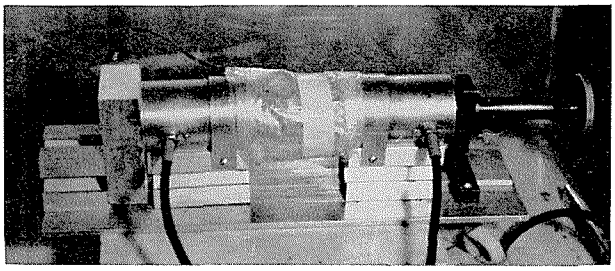
第1図 試料の粒度分布（累積頻度曲線）

これらの土の試料から凍土試料を作るには，次のようにした。まず，風乾した土の試料に水飽和の状態になるまで蒸留水を加えた。これを室温で乾燥させて行ったのであるが，その過程で，所定の含水比まで乾燥するごとに試料をとり出し，内法が長さ 12 cm 直径 5 cm の円筒状の整形容器の中へタッピングしながらつめこんだ。ただし，粘土の場合には，乾燥する過程において粒子相互間の結合が強くなり，団粒化が進む恐れがあるので，はじめから一定量の乾燥土に既知量の蒸留水をまぜ合わせるようにした。このようにして，整形用の容器につめこまれたものを，−30°C の低温室に入れて凍らせた。3 時間ほどで試料は全部凍ってしまう。この程度の冷却速度では，試料内に局部的なレンズ状氷が析出すること，つまり凍上がなく[1]，氷は一様に分散して現われた。翌日，−10°C の低温室に移し，十分時間がたってから，整形容器内から土をとり出し，岩石カッター（ダイヤモンドのブレードつき）を用いて両端面を整形した。圧縮試験用には直径 5 cm，長さ 10 cm の円筒形に，又超音波伝播速度測定用には直径 5 cm 長さ 5 cm の円筒形にした。さらに両端面にヤスリをかけ，両面の平行性に留意した。このようにして出来上った凍土の試料を秤量し，密度を求めた。次にこれを所定の温度の低温室に 24 時間放置し，試料内の温度が十分一様になってから測定を始めた。土質，含水

(a)



(b)



第2図 (a) 一軸圧縮試験装置
(b) 超音波伝播速度測定装置

比，温度の条件の同一のものを常に2つずつ作って実験した。又，比較のため，市販氷についても実験した。この場合の整形には，低温室内にある旋盤を用いた。

2. 実験装置

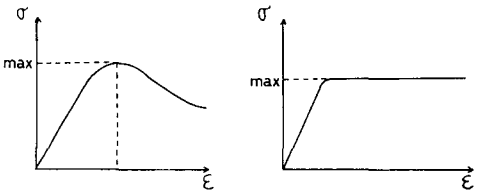
一軸圧縮試験には，油圧式の万能試験機（容量10トン）を用いた。第2図(a)に装置の写真を示す。ストレンペーサーを用いて試験中の圧縮速度を一定に保つことが出来る。荷重と変位とを同時に記録するため，ロードセル（容量5トン）とダイアルゲージ（最大2cm）を設置し，直流増幅器を通して，X-Yレコーダーに記録した。

超音波伝播速度の測定には，パルス法を用いた。第2図(b)に装置を示す。試料を中にはさんで，左側が発信部（チタン酸バリウム系セラミック）で，右側が受信部である。試料の有効接触直径は3cmである。発信部と受信部に感ずる超音波をシンクロスコープに取り出し，試料内を伝播する時間を測って，試料内を伝わる超音波の速度を求めた。縦波速度(V_p)，横波速度(V_s)を求めたのであるが，縦波には400 kHz，横波には40 kHzを用いた。

III. 実験結果

1. 一軸圧縮試験における応力—歪曲線

応力—歪曲線として第3図にあるようなほぼ二つの型が得られた。ひとつは，始め，歪とともに応力が増大するが，ある所で最大値に達しその後減少する。砂や，温度の低い含水比の大きいシルトや粘土がこのような曲線の傾向を示した。最大応力時の歪は1～4%であるが，一般に含水比が大きくなるにつれ小さい値をとった。応力が最大値をこしてからは，試料内に目に見えるような割れ目が発生した。



第3図　一軸圧縮試験における応力—歪曲線の2つの型

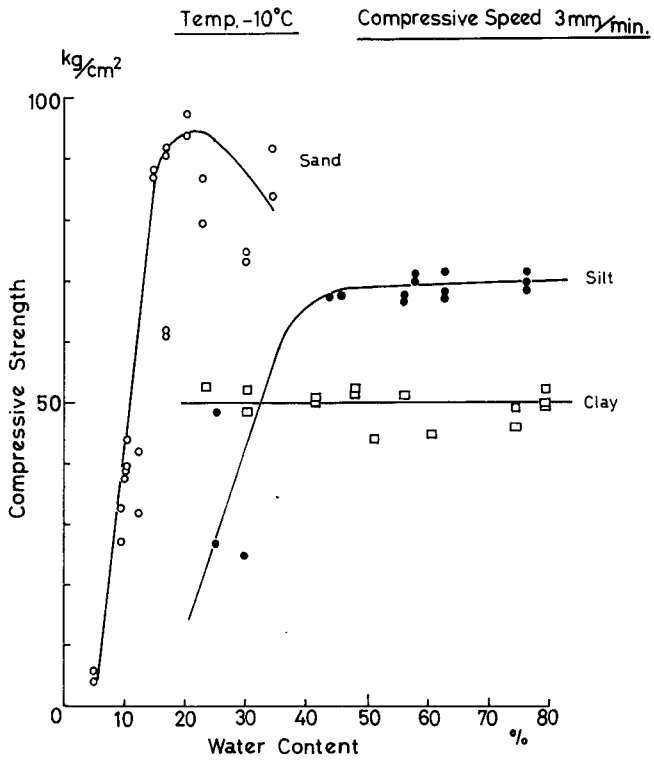
もうひとつは，始め，歪とともに増大した応力がある所からはほぼ一定の値をとった。圧縮の様相は塑性的で，割れ目は見られなかった。温度の高い含水比の小さいシルトや粘土がこのような変化を示した。一定応力になる時の歪は5～15%であった。

ここでは，両方の曲線とも応力の最大値をとり出して，圧縮強度とすることにした。

2. 圧縮強度・V_p・V_sの含水比依存関係

圧縮速度3 mm/min（歪速度5×10^{-4} 1/sec）のときの圧縮強度と含水比の関係を第4図に示す。土質によって特徴的な変化がみられる。砂では，20%の含水比より小さい所で，含水比とともに圧縮強度の増大が見られるが，20%をこすと，むしろ圧縮強度は減少する傾向にある。圧縮強度の最大値は94 kg/cm^{2}位である。シルトもほぼ同じで，含水比44%位までは，含水比とともに圧縮強度が増大する傾向にあるが，40%をこすと，ほぼ一定の値70 kg/cm^{2}をとる。又，粘土の場合には，含水比25%より小さい試料を作ることは出来なかったが，含水比25～80%の範囲で圧縮強度はほぼ一定の50 kg/cm^{2}である。

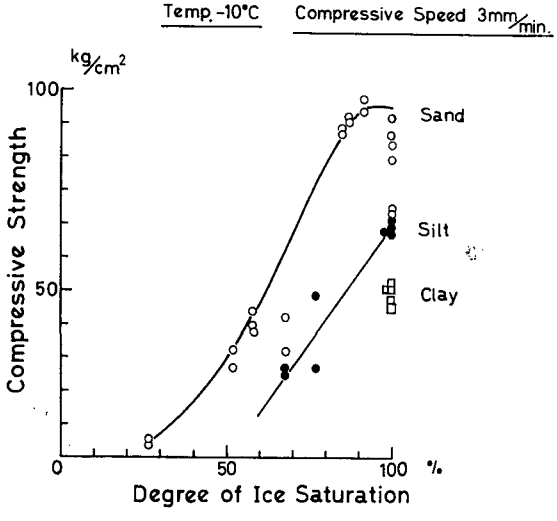
真井[2]は，砂について筆者等と同じ様な結果を得ているが，粘土については，含水比の小



第4図 圧縮強度と含水比との関係

さい所でも実験を行ない，含水比35%位までは含水比のますとともに圧縮強度が増大するという結果を得ている。

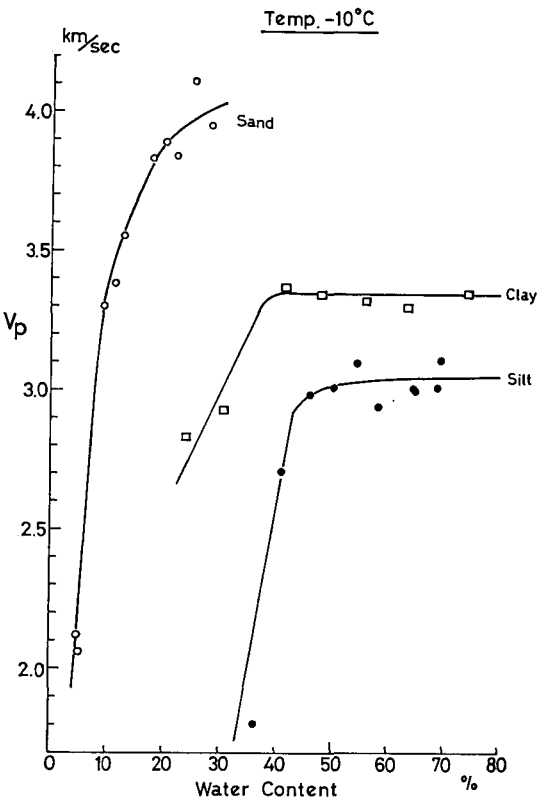
次に，圧縮強度と氷飽和度（氷による空隙の充填度合）との関係を第5図に示す。砂とシルトについては，氷飽和度の増加とともに圧縮強度は直線的に増加する。氷飽和度100%のときが圧縮強度の最大値になる。第4図において，砂とシルトの場合，含水比がある値より大きい所では，圧縮強度がほぼ一定かむしろ多少減少することを示したが，これは，その含水比の所で氷飽和，つまり試料内の空隙が全部氷でみたされたことに対応する。更にそれ以上に試料内の空隙に氷が入りこむ場合には，圧縮強度には影響しないという結果になる。このことは粘土についても言えるようである。第5図に示すように，この実験では，含水比25～80%の粘土はすべて氷飽和で，従って圧縮強度も一定値をとったと言える。



第5図 圧縮強度と氷飽和度との関係

圧縮強度の値は，砂が大きく，シルト，粘土と粒径が細かくなるにつれ小さくなる。これは凍っていないときとは，逆の傾向で，特徴的なことである。

次に，−10°C のときの，V_p と含水比との関係を第 6 図に示す。砂，シルト，粘土とも，含水比の小さい所では，V_p は含水比とともにほぼ直線的に増大するが，砂では含水比 20% 以上で，ゆるやかな増大となる。又シルトでは 40% 位，粘土では 35% 以上で，ほぼ一定値となり，それぞれ 3 km/sec 及び 3.3 km/sec を示す。圧縮強度については，砂，シルト，粘土の順であったが，V_p については，砂，粘土，シルトの順になっている。



第 6 図　縦波伝播速度 V_p と含水比との関係

次に，−10°C のときの，V_s と含水比との関係を第 7 図に示す。V_p よりも含水比による変化の幅は小さい。V_p の場合と同じく，砂，粘土，シルトの順になっている。又，含水比に対する変化の様相は，砂，シルトについては V_p とほぼ同じであるが，粘土については，一定値だけを示した。この変化の様相は，圧縮強度の含水比に対する変化の様相によく似ている。粒状媒質中の横波の伝播は，弾性体粒子の相互のずり振動によるものであるため，粒子相互の結合状態が反映される。このことが，横波の伝播速度が圧縮強度に対応することをもたらすのであろう。

第 8 図に，−10°C のときの圧縮強度と V_s との関係を示す。砂とシルトではほぼ直線関係がえられる。又，粘土では，この場合 25～80% の氷飽和状態だけであるが，ほぼ一点で表される。これらを次の実験式で示すことが出来る。

砂では，　$\sigma_c = 165\,V_s - 177$,

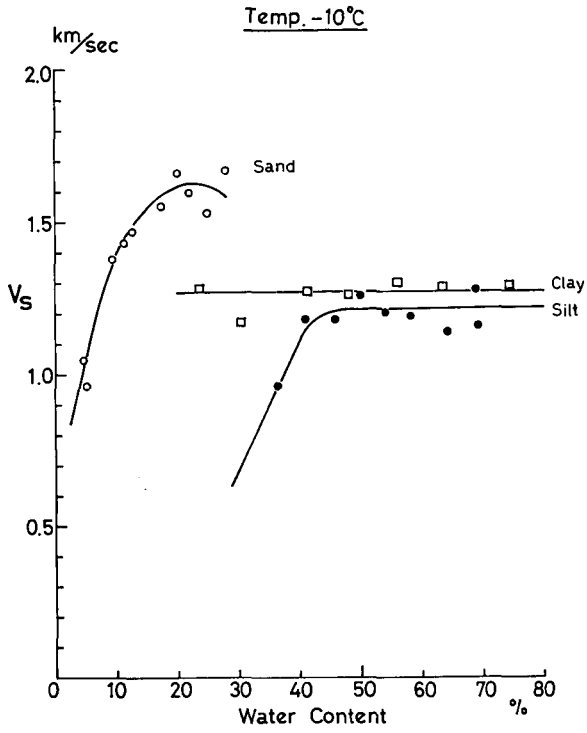
シルトでは，　$\sigma_c = 54\,V_s + 7$,

粘土では，　$\sigma_c \approx 50$,　$V_s \approx 1.3$.

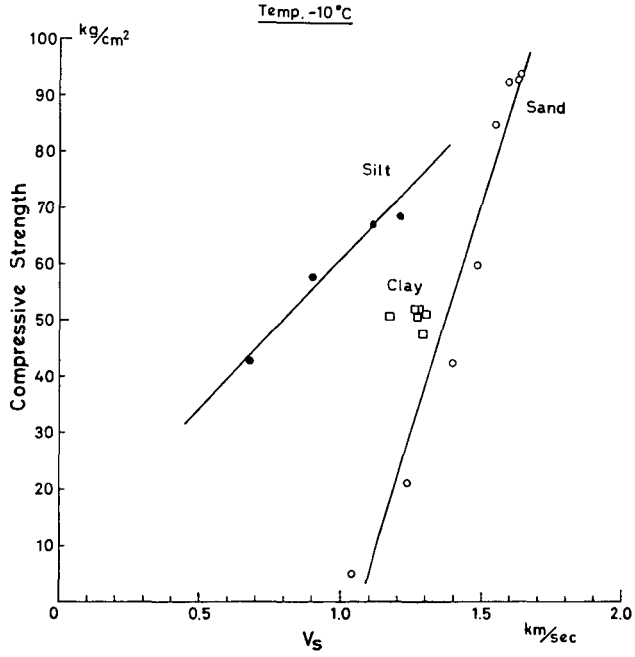
ここで，σ_c は圧縮強度 (kg/cm^2)，又 V_s は横波伝播速度 (km/sec) である。

3. 圧縮強度・V_p・V_s の温度依存関係

飽和状態における凍土の圧縮強度と温度との関係を第 9 図に示す。比較のため氷の値を点線で示してある。これは Butkovich[3] の実験結果からとったものである。筆者等も −10°C のときに，氷の圧縮強度を求めたが，この Butkovich の値と一致した。温度が低くなるにつれ，凍土の圧縮強度は増大し，一番強い砂では，氷の 4 倍にもなる。砂，シルト，粘土の順序は，



第7図　横波伝播速度 V_S と含水比との関係



第8図　V_S と圧縮強度との関係

含水比依存関係と同じである。筆者等は−35°Cまで実験を行ったが，この強度では，圧縮強度の増大は温度に対して少しずつゆるやかになって行く傾向を示した。しかし，Шушерина[4]は，−50°C以下では，圧縮強度の増大が急になる傾向を得ている。次の機会に検討を加えてみたい。

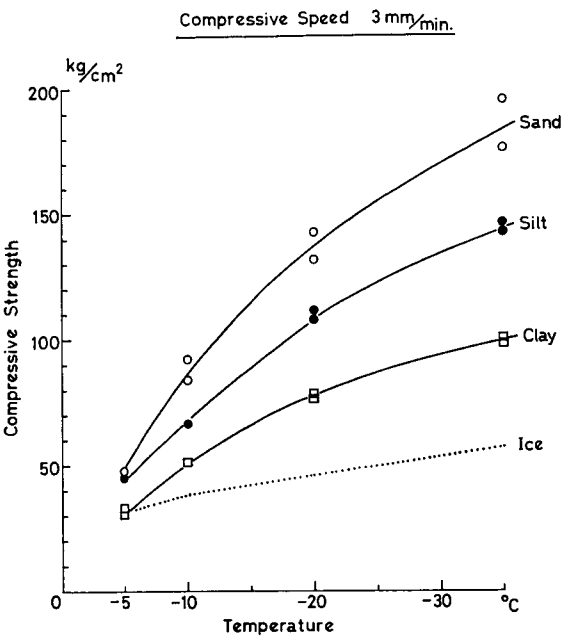
第10図に，飽和状態におけるV_pと温度との関係を示す。温度が低くなるとV_pは大きくなるが，砂と氷は変化幅が小さい。シルトと粘土では，−10°Cを境にしてそれより高温領域の方が，低温領域よりV_pの温度依存性が強い。

凍土は，土粒子・氷・不凍水・空隙から構成されている。粒の細かい土質ほど不凍水分量が多いが，温度の低下とともに減少する。

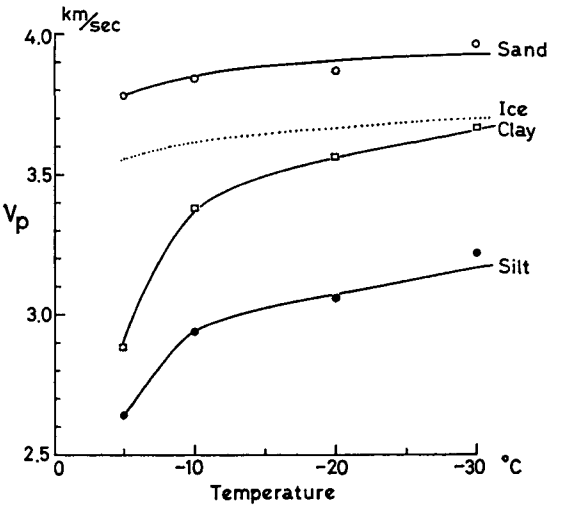
第10図の曲線でシルトや粘土に上記のような特徴が現われたのは，この不凍水分量が効いているのであろう。Nakano[5]は，このことから逆に不凍水分量を求める試みを行っている。

V_pの値が砂，粘土，シルトの順になっているのは，含水比関係のときと変りない。氷の値が砂と粘土の間に入ることは，圧縮強度における氷の小さい値と比べて，特徴的である。

第11図にV_sと温度との関係を示す。温度が低くなるにつれ，V_sは増大する傾向は見られるが，その変化幅は小さい。又，シルトや粘土にV_pのような特徴的な傾向が顕著でない。このことは，横波は不凍水分量に余り依存しないことを示すものであろう。



第9図　圧縮強度と温度との関係
(飽和状態について)



第10図　V_pと温度との関係（飽和状態について）

4. 圧縮強度と圧縮速度との関係

−10°Cのときに，圧縮速度を3, 10, 20 mm/minと変えて，圧縮強度との関係を調べた。その結果を第12図に示す。図中右上部の数字の%は，それぞれの土質の試料の含水比を示す。いずれも氷飽和の状態である。

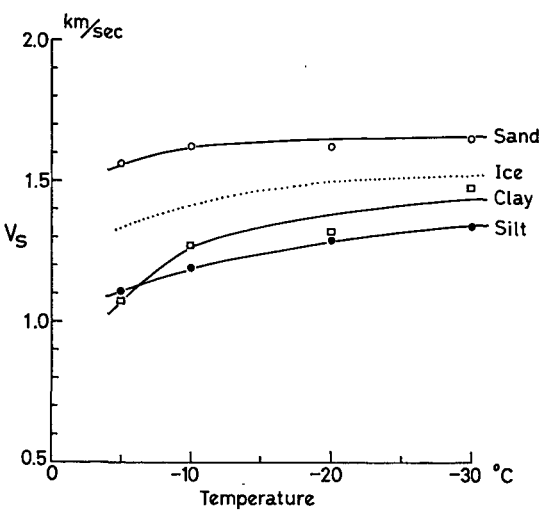
一般に粘弾性物質では，圧縮強度は圧縮速度が増すと増大する傾向があるが，凍土についてもその傾向が見られた

5. 凍土の弾性定数

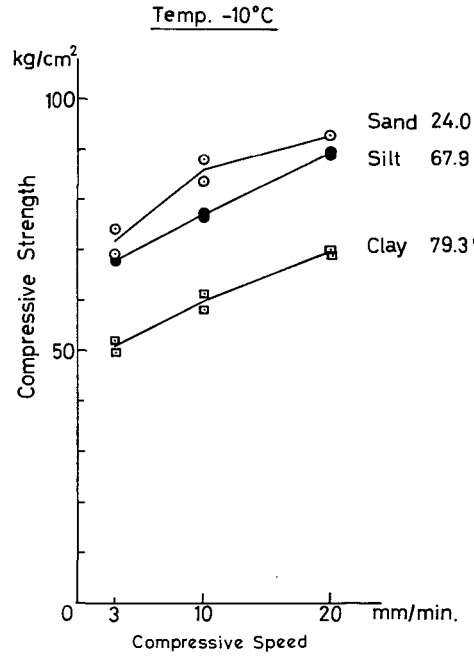
凍土を均質な弾性体と仮定して，一軸圧縮試験の応力—歪曲線のはじめの直線部分から，静的ヤング率 E_s を，又超音波伝播速度から，動的ヤング率 E_D，又動的剛性率 G を求めてみた。

−10°C のときの砂の $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係を第13図に，シルトの $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係を第14図に，又粘土の $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係を第15図に示す。弾性体であれば，静的ヤング率 E_s と動的ヤング率 E_D とは同じ筈であるが，粘弾性体の場合には，E_D の方が E_s よりも大きい。その割合 E_D/E_s の値は，砂の場合，含水比 30% で 17, 10% で 60, シルトの場合，65% で 10, 36% で 20, 粘土の場合，56% で 15, 24% で 20 であり，一般に含水比の小さい方が，E_D/E_s の値は大きい。

氷飽和の状態のときの $E_D \cdot E_s$ と温度との関係を第16図に示す。共に温度の低下とともに増大する。E_D/E_s の値は，砂の場合，−30°C で 11, −5°C で 23, シルトの場合，−20°C で 6, −5°C で 15, 粘土の場合，−30°C で 7, −5°C で 20 で，温度の上昇とともに E_D/E_s は大きくなる。氷の場合は，−10°C のときに E_D は 4.8×10^{10} dyn/cm², E_s は 2.2×10^{10} dyn/cm² で，E_D/E_s の値は 2 にすぎない。



第11図 V_s と温度との関係（飽和状態について）

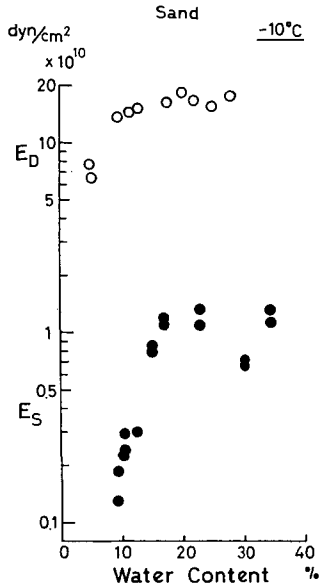


第12図 圧縮強度と圧縮速度との関係

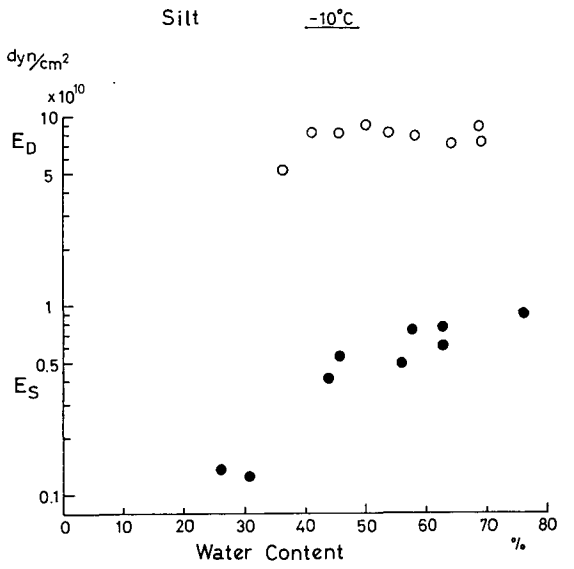
次に，横波の伝播速度 V_s から求めた動的剛性率 G と含水比との関係及び氷飽和の状態についての温度との関係を，それぞれ第17図と第18図に示す。

IV. ま と め

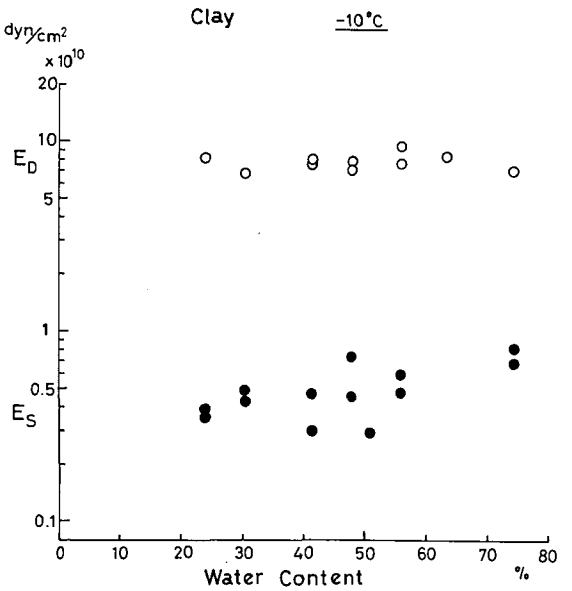
凍土の一軸圧縮試験と超音波伝播速度の測定から，圧縮強度と動的性質とを調べた。その結果をまとめると次のようになる。



第13図　砂の $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係



第14図　シルトの $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係

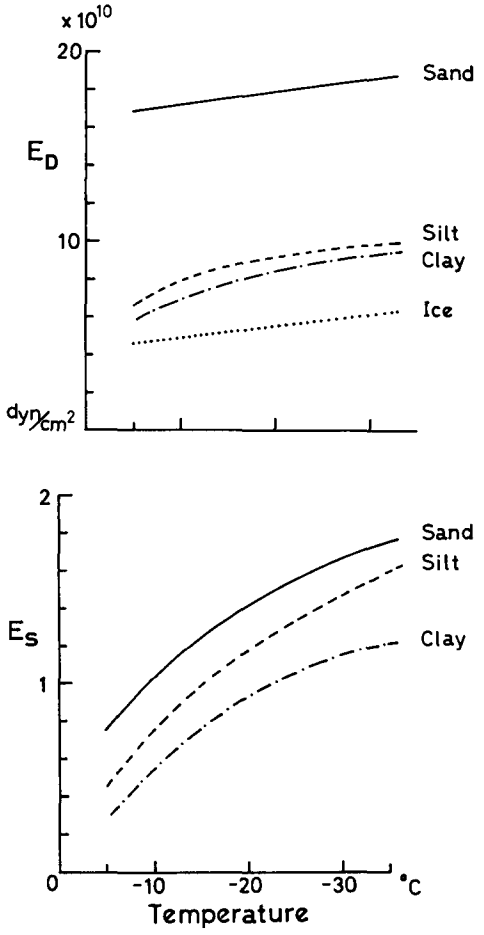


第15図　粘土の $E_s \cdot E_D$ と含水比との関係

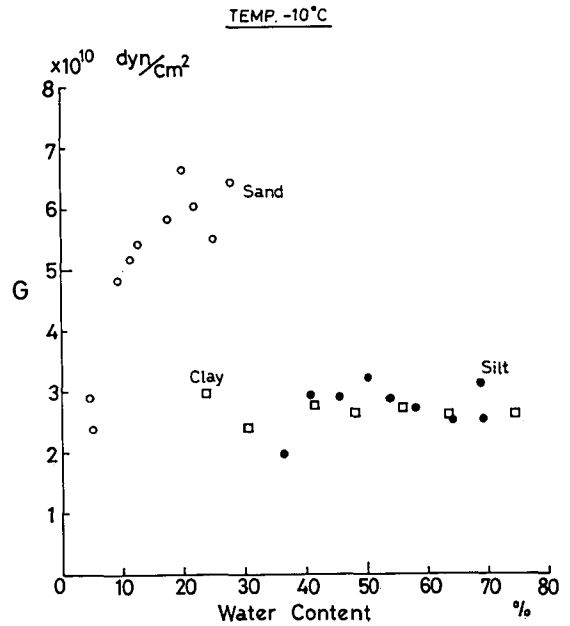
1. 一軸圧縮試験から得られた応力―歪曲線は二つの型に分けられ，一方は，ある歪の所で最大値をとり，他方は，ある歪を越すと応力がほぼ一定であった。

2. 圧縮強度・V_p・V_s は，土質によってかなり異なり，一般に氷飽和度の増加とともに増大する。

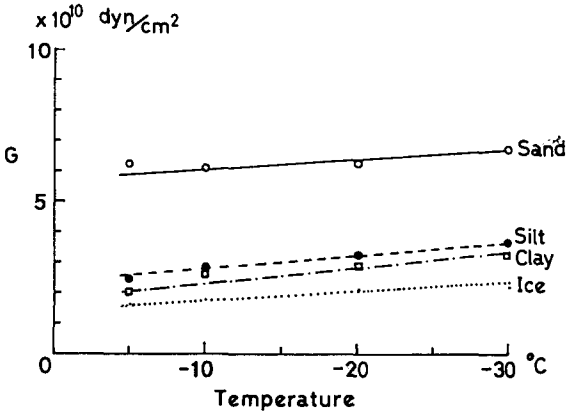
3. 含水比に対する圧縮強度の関係と，V_s の関係とはよく似ている。



第16図 E_D・E_S と温度との関係（飽和状態について）



第17図 G と含水比との関係



第18図 G と温度との関係（飽和状態について）

4. 圧縮強度・V_p・V_s は，温度の低下とともに増大する。とくに，−10°C より高い温度のときの V_p の変化は著しく，不凍水分量に依存するものと思われる。

5. 動的ヤング率は，静的ヤング率より数倍から数十倍も大きい。

この研究を行うにあたり，低温科学研究所凍上学部門の鈴木義男助教授，堀口薫，福田正己の両助手から有益な助言を得た。ここに感謝の意を表する次第である。なお，本研究は文部省の凍上研究に対する臨時事業費および日本学術振興会日米科学協力計画「土の凍結融解に伴う水分の移動」(4 R 020) によって行われた。

文　献

1) 堀口　薫 1975 粉状物質における冷却速度と凍上速度の関係. 低温科学, 物理篇, **33**, 227-236.
2) 真井耕象 1957 凍土の強度について. 北大工学部研究報告, **16**, 45-68.
3) Butkovich, T. R. 1954 Ultimate strength of ice. *SIPRE Res. Rept.*, **11**, pp. 12.
4) Шушерина Е. П., Бобков Ю. П. 1968 Исследование механических свойств мерзлых грунтов при низких отрицательных температурах (от-10 до-50°C). Мерзлотные Исследования, Вып. 8, ИЗД-во МГУ, 279-286.
5) Nakano, Y. and Froula, N. H. 1973 Sound and shock transmission in frozen soils. *In* Permafrost Second International Conference, National Academy of Sciences, 359-369.

Summary

Mechanical properties of frozen soil were studied by using both static and dynamic methods as the function of water content, temperature and soil types. As to the static method, compressive strengths were measured by uniaxial compression tests. As to the dynamic method, velocities of dilatational (400 kHz) and shear (40 kHz) waves were measured by the ultrasonic pulse method. As regards the soils, temperatures ranged from −5 to −30°C, water contents varied from a nearly dry state to a water-saturated state, and the types were sand, silt and clay.

Results obtained are summarized as follows:

1) In case of uniaxial compression, two typical curves of stress-strain were observed: the one has the maximum value of stress at a certain strain; the othe has a value of stress which becomes constant when the strain exceeds a certain value.

2) Compressive strength increased with increasing water content and also with increasing grain size. The same tendencies were observed in the velocities of dilatational and shear waves, as regards water content, but not exactly so concernning grain size.

3) A strong correlation between compressive strength and velocity of shear wave was observed as a function of water content under −10°C.

4) The increases of strength and both velocities were observed with lowering temperatures. Especially, increasing rate of velocity of dilatational wave was quite remarkable above −10°C. These facts might suggest that the amount of unfrozen water strongly affects velocity of dilatational wave.

5) Values of dynamic Young's modulus E_D, which are obtained from the velocities of untrasonic waves, were 3-80 times as large as values of static Young's modulus E_s, which are obtained from the stress-strain curves of uniaxial compressions.